

## オゾンホール下の太陽紫外放射環境

竹下 秀<sup>1</sup>・宮岡 宏<sup>1</sup>・江尻全機<sup>1</sup>・佐々木政子<sup>2</sup>

### Solar ultraviolet irradiance in the ozone hole region in Antarctica

Shu Takeshita<sup>1</sup>, Hiroshi Miyaoka<sup>1</sup>, Masaki Ejiri<sup>1</sup> and Masako Sasaki<sup>2</sup>

**Abstract:** To analyze characteristics of solar ultraviolet irradiance in the ozone hole region, solar ultraviolet-B (UV-B: 280–315 nm) and ultraviolet-A (UV-A: 315–400 nm) irradiance at noon were measured from October 4, 1999 to January 31, 2000 at Syowa Station in Antarctica (69°00'S, 39°35'E). UV-B irradiance measured at Syowa was compared with UV-B irradiance measured at Tokai University, in Hiratsuka, Kanagawa, Japan (35°21'N, 139°16'E). Maximum irradiance of the UV-B at Syowa was measured early in December 1999. It is equal to the maximum irradiance of UV-B measured in the middle of June 1999 and/or early in September 1999 at Hiratsuka. UV-B and UV-A irradiance at Syowa showed less scatter than that at Hiratsuka. This implies that the difference of scatter between irradiance at Syowa and at Hiratsuka may be attributed to the cloud types which appeared over both observation sites, providing different shielding effects of cloud types for UV irradiance. By eliminating the cloud effect by dividing UV-B irradiance by UV-A irradiance (UV-B/UV-A), a high negative correlation was obtained between UV-B/UV-A and the effective ozone amount. By applying this correlation, total ozone amount can be estimated by use of the values of UV-B/UV-A and air mass.

**要旨:** オゾンホール領域内の太陽紫外放射環境を把握するために、1999年10月4日から2000年1月31日の現地時刻12時に、全天太陽UV-B放射量と全天太陽UV-A放射量(以後、それぞれUV-B量、UV-A量と略記)を南極昭和基地で観測した。この観測データを神奈川県平塚市で観測されたUV-B量、UV-A量と比較解析した。昭和基地では12月上旬に最大UV-B量1.73 W/m<sup>2</sup>を記録し、この放射量は平塚市の6月中旬と9月上旬のUV-B量に等しかった。昭和基地のUV-B量、UV-A量は平塚市の観測データと比較して変動幅が小さかった。これは、昭和基地と平塚市では雲形が異なり、雲形によって太陽紫外放射の遮蔽効果が違うためと考察された。UV-B量から天気の影響を除去するためにUV-B量/UV-A量を求めた。UV-B量/UV-A量と実効オゾン全量との間には強い負の相関が得られた。これよりUV-B量/UV-A量とエアマスをを用いて、オゾン全量が推定可能であることを示した。

<sup>1</sup>国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

<sup>2</sup>東海大学総合科学技術研究所, Research Institute of Science and Technology, Tokai University, Kitakaname 1117, Hiratsuka 259-1292.

## 1. 序 論

南極の昭和基地（南緯 69 度 00 分，東経 39 度 35 分）で春から夏（9 月から 12 月）にかけてオゾンホールが出現することが，これまでの衛星観測や地上観測などで明らかになっている。地上に到達する中波長域太陽紫外放射（UV-B: 280-315 nm）は成層圏オゾンの変動と密接な相関を持ち（伊藤ら，1991; Bais *et al.*, 1993; Blumthaler *et al.*, 1995; Bodhaine *et al.*, 1997），我々もこれまでの地上観測から，1% のオゾン全量の減少が 2.8% の UV-B 量の増加を導くことを明らかにしている（Takeshita *et al.*, 1992）。この UV-B 放射は生物損傷活性が高く，成層圏オゾンの減少はヒトに対しては皮膚ガンや白内障の増加，免疫力の低下による感染症の増加を招く（UNEP, 1989）。また，成層圏オゾンがオゾンホール出現前の状態に戻るのは来世紀中頃と推算されている（WMO/UNEP, 1998）。オゾンホール下の南極域で越冬隊員が浴びる UV-B 量を測定評価することは，南極における観測活動を進める上で必須な要件と考察される。

昭和基地の春はオゾンホールの生成が始まると同時に，野外調査活動が本格化し，基地内においても多くの越冬隊員が長時間屋外作業に従事する。さらに，昭和基地は 11 月中旬以降白夜になり長時間の屋外活動が可能となる。また，国内と異なり周辺が雪や海水で覆われているため，地表面から反射し皮膚に到達する放射や，地表面と大気との多重反射による放射の増加効果も無視できないと考えられる（遠藤ら，1998）。このようなオゾンホール下の太陽紫外放射環境についてはほとんど報告されていない。著者の一人竹下は第 40 次越冬隊に参加し，1999 年 10 月から 2000 年 1 月にかけて南極昭和基地（南緯 69 度 00 分，東経 39 度 35 分，海拔 29.18 m）で全天紫外放射量（UV 量）を観測した。本報では昭和基地のオゾンホール下での UV-B の挙動を明らかにし，さらに国内中緯度帯での観測値との比較解析を行った。また，UV-B 量とオゾン全量について解析した。

## 2. 観 測 方 法

観測には携帯型の市販紫外放射計（MS-210I: 英弘精機）を使用した。この放射計は受光部が取り外し可能で，UV-B 測定用の受光部と長波長紫外放射（UV-A: 315-400 nm）測定用の受光部が交換可能となっている。1999 年 10 月 4 日から 2000 年 1 月 31 日までの 101 日間，1200 LT に全天 UV-B 量と全天 UV-A 量を観測した。ただし，基地作業などがあった日は，観測時刻を 1200 LT 前後に変更した（11 月 14 日: 1150; 12 月 27 日: 1205; 11 月 13 日，1 月 2 日: 1210; 12 月 28 日: 1215; 12 月 2 日，1 月 14 日: 1220; 11 月 8 日: 1300）。昭和基地の 1200 LT はほぼ北中時間に相当するため，1 日のほぼ最大放射量が記録できる。観測に使用した UV-B 用，UV-A 用の両放射計は観測終了後国内に持ち帰り，東海大学光環境計測システム（Sasaki *et al.*, 1993）で使用している UV-B 放射計（MS210W: 英弘精機）と UV-A 放射計（MS210A: 英

弘精機)と共に 2000 年 4 月から 5 月の期間比較測定した。昭和基地で観測したデータはこの比較測定結果に基づいて国内の準器と整合性がとれるように補正した。なお、昭和基地での日射量 (300-3000 nm) とオゾン全量は気象庁が昭和基地で実施している定常観測のデータを使用した。

### 3. 観測結果と解析

昭和基地での全観測期間の UV-B 量、UV-A 量および日射量 (300-3000 nm) の変動を図 1 に示す。UV-B は 12 月上旬に最大放射量  $1.73 \text{ W/m}^2$  (12 月 4 日, 12 月 10 日) を示した。一方, UV-A は, UV-B とは異なり 12 月上旬から 1 月上旬に最大放射量  $50.7 \text{ W/m}^2$  (12 月 17 日) を

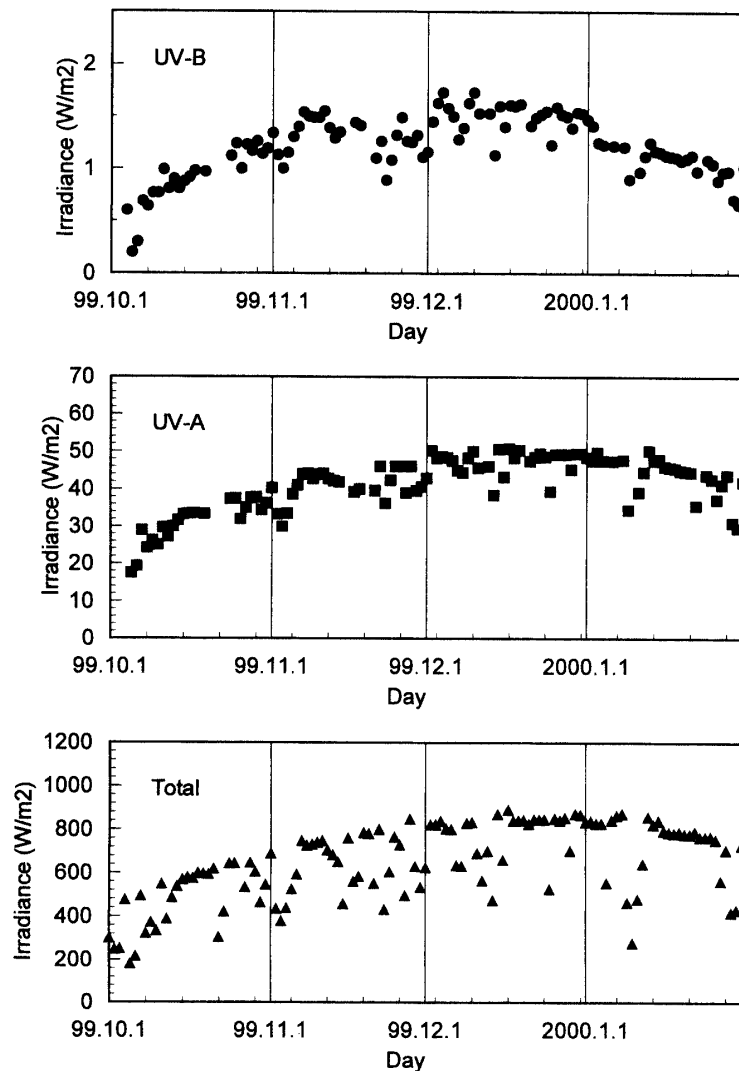


図 1 毎正午の昭和基地の全天 UV-B, 全天 UV-A, 全天日射量 (1999/10/4-2000/1/31)  
Fig. 1. Global solar UV-B, UV-A and total irradiances at noon from October 4, 1999 to January 31, 2000 at Syowa Station.

示した。日射は UV-A と同様に 12 月上旬から 1 月上旬に最大となった。

図 1 に示すように、全観測期間を通して、観測された UV-B、UV-A および日射はいずれも日ごとに異なる変動を示している。また、日射は UV-B と UV-A に比較して大きい変動を示している。各放射とも天気が長期間安定し、晴天が続いた 12 月中旬から 1 月下旬の期間はほぼ滑らかに変動している。しかし、曇りや雪の日が多かった 12 月中旬以前は日毎の変動幅が大きい。以上から、日毎の各放射量の変動には天気の影響、特に雲による遮蔽効果の影響が大きいと考察される。

ここで、UV-B、UV-A および日射の変動幅の違いを評価する。UV-B と UV-A は日射に比べて明らかに変動幅が小さい。Estupinan and Raman (1996) によると、一般的に UV-B は日射に比較して雲の影響を受けにくい。今回の観測結果はこの報告の傾向を示している。

UV-B の地上到達に影響する主な変動因子としては、太陽高度、オゾン全量、エアロゾル、地表反射率、天気がある。観測時の太陽高度の関数である大気路程 (エアマス) の変動とオゾン全量日代表値の変動を図 2 (上) に示す。エアマス (図 2 上左軸) は 12 月中旬 (夏至) に最小となる。一方、オゾン全量日代表値 (図 2 右軸) は 10 月中旬から 11 月上旬の期間に最小値を示し、12 月下旬までオゾン全量が 220 DU 以下のオゾンホール状態が続いた (気象庁, 2000)。オゾン全量は鉛直大気中のオゾン量である。大気路程中のオゾンによる UV-B 吸収効果

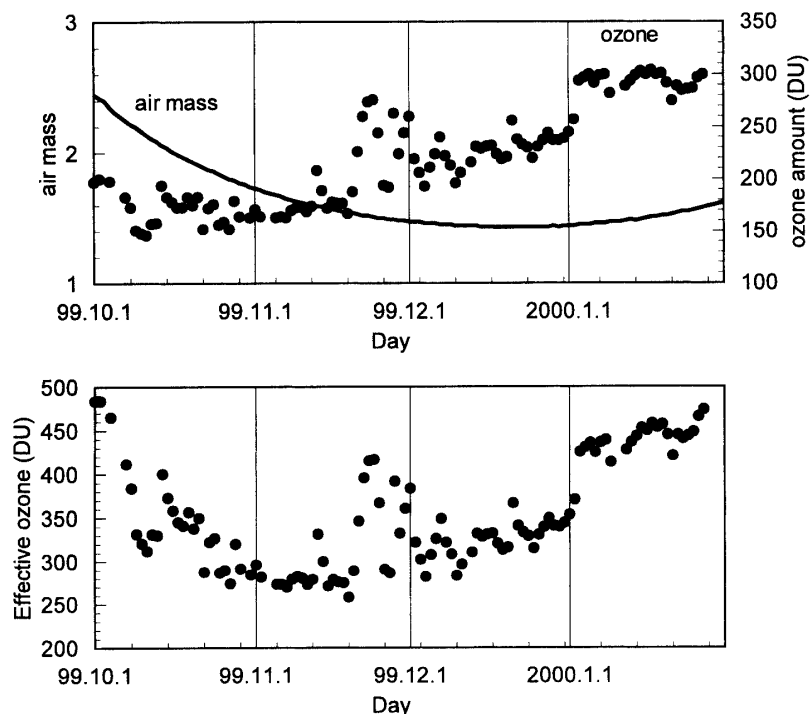


図 2 昭和基地のエアマス、オゾン全量 (上) と実効オゾン全量 (下)  
(1999/10/1-2000/1/31)

Fig. 2. Air mass, total ozone (upper panel) and effective ozone (lower panel) from October 1, 1999 to January 31, 2000 at Syowa Station.

を評価するために、大気路程中のオゾン量を実効オゾン全量（オゾン全量とエアマスの積）と定義する。実効オゾン全量の変動を図 2（下）に示す。この図から実効オゾン全量は 11 月下旬から 12 月上旬に最小値を示すことがわかる。この実効オゾン全量の変動は、UV-B 量の変動（図 1）とほぼ逆対照の変動を示している。図 2（下）で見るように実効オゾン全量が一時的に増加した 11 月中旬から 12 月上旬に、図 1 に示した UV-B 量は一時的に減少傾向になっている。

以上まとめると、昭和基地で観測された UV-B 量と実効オゾン全量との間には明らかな負の相関が見いだされた。また、エアマスは UV-A 量および日射量の変動と対称性のよい相関を示した。このことは UV-A 量と日射量はオゾンの影響は受けず太陽高度のみの関数であることを明瞭に示している。

#### 4. 考 察

昭和基地で観測した UV 量を 1999 年 1 月から 1999 年 12 月に神奈川県平塚市（東海大学湘南校舎：北緯 35 度 21 分，東経 139 度 16 分，海拔 51 m）で観測された UV 量（Sasaki *et al.*, 1993）と比較した。なお、東海大学では UV-B、UV-A、日射を 24 時間連続観測しているが、今回は 1200 LT の瞬時値の全天放射量を抜き出し解析対象とした。東海大学で観測された UV-B 量、UV-A 量、日射量の変動を図 3 に示す。UV-B は 7 月 27 日に最大値  $2.25 \text{ W/m}^2$  を示し、UV-A は 8 月 5 日に最大値  $62.1 \text{ W/m}^2$  を、日射は 8 月 6 日に最大値  $1120 \text{ W/m}^2$  を示した。図 1 と図 3 を比較すると、昭和基地で観測された最大 UV-B 量 ( $1.73 \text{ W/m}^2$ : 12 月 4 日，12 月 10 日) は、平塚市の 6 月中旬あるいは 9 月上旬正午の放射量にほぼ一致する。一方、昭和基地の最大日射量 (約  $800 \text{ W/m}^2$ ) は、平塚市の 3 月中旬，9 月上旬の放射量とほぼ同じである。すなわち、昭和基地で地上に到達する夏の日射量は国内の晩春や初秋と同等である。しかし、UV-B は国内の初夏や初秋の放射量と同等である。このことは、昭和基地の夏には国内の初夏や初秋と同程度の UV-B 量があり、南極でも UV-B 防御対策が必要であることを示唆している。

次に、南緯 69 度にある昭和基地と国内中緯度帯（平塚市）の観測値を比較するため、UV-B 量、UV-A 量および日射量のエアマスとの相関を比較検討した（図 4）。

昭和基地の正午の観測データは、エアマス 1.4 から 2.4 の間に分布している。一方、平塚市の正午の観測データは、エアマス 1.0 から 2.0 の間に分布している。これは、昭和基地が平塚市より高緯度に位置しているためである。また、昭和基地、平塚市共に同じエアマスでも各放射量にはバラツキがあり、バラツキの度合いは昭和基地で小さく平塚市では大きいという違いがある。以上の結果を踏まえて、以下の 3 項目を検討した。

##### 4.1. 昭和基地と平塚市の UV-B 量、UV-A 量および日射量の相異

各エアマスにおける最大放射量を結んだ曲線は晴天時の放射量と考えてよい。同一のエアマスで昭和基地の UV-B 量は、平塚市の観測値の約 2 倍である。一方、昭和基地の UV-A 量と日

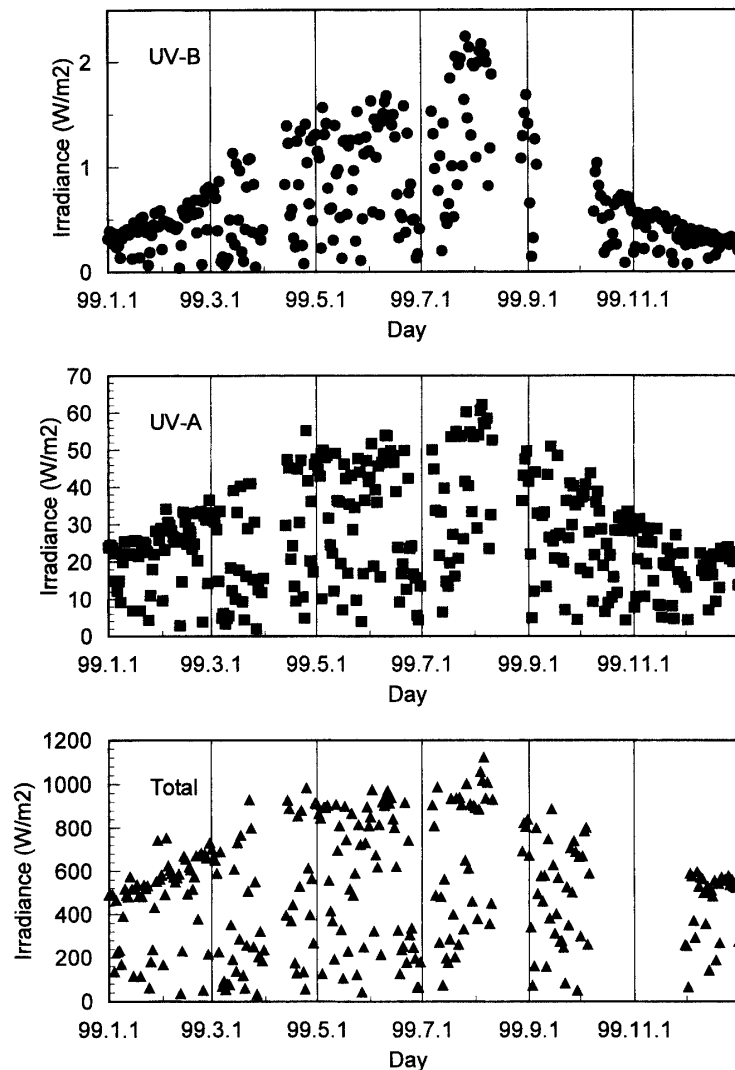


図3 1999年の神奈川県平塚市の正午の全天 UV-B, UV-A, 日射量

Fig. 3. Global solar UV-B, UV-A and Total irradiances at noon in 1999 at Hiratsuka, Kanagawa, Japan.

射量は平塚市の観測値の約10%から20%増程度である。McKenzie and Paulin (1998)によると、UV-A領域において雪面と大気多重反射による放射量の増大効果は太陽天頂角70度で22%程度とされている。昭和基地のUV-A量が平塚市の20%増程度であったのは、雪面と大気多重反射の影響と考察される。

昭和基地と平塚市のUV-B量の大きな差は、雪面と大気多重反射の効果以外に、両地域のオゾン全量の違いを反映していると考えられる。前述したようにUV-B量(図1上)と実効オゾン全量(図2下)の間には負の相関が見られる。ここで、昭和基地および平塚市のUV-B量と実効オゾン全量との相関を求めた(図5)。なお、東海大学ではオゾン全量を観測していない。そこで、平塚市とほぼ等緯度の気象庁高層気象台(筑波)から提供されたオゾン全量月平均値

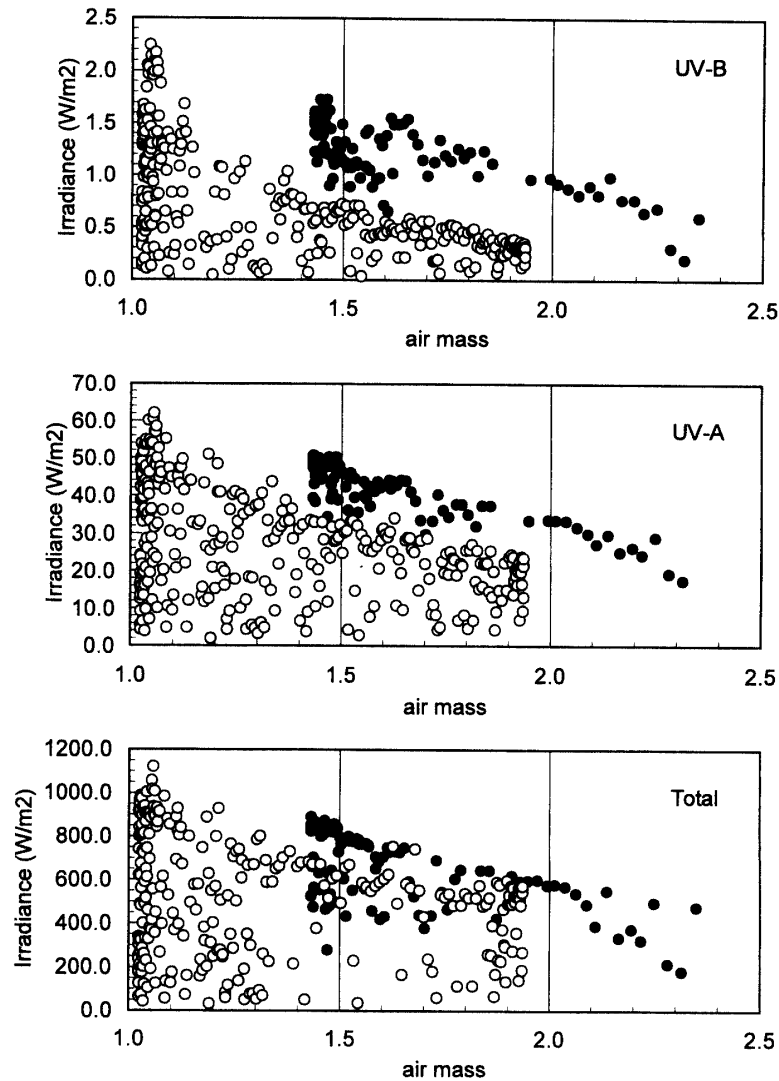


図4 全天放射量とエアマスの相関 (●: 昭和基地, ○: 平塚市)  
 Fig. 4. Relationships between global solar irradiance and air mass.  
 (●: Syowa, ○: Hiratsuka)

を使って、平塚市の実効オゾン全量を推定した。

図5をみると、昭和基地と平塚市のUV-B量は実効オゾン全量が同値の時ほぼ同じ放射量を示している。このことは同一エアマスにおいて昭和基地ではオゾン全量が小さいために、UV-B量は平塚市の約2倍になったことを示している。なお、前述の McKenzie and Paulin (1998) によると、UV-B領域の雪面と大気多重反射による効果は28%程度であり、太陽天頂角が大きくなるほど増大するとされている。図5には多重反射の効果が出ていないが、これは実効オゾン全量にはオゾンとエアマスの2つの独立なファクターが含まれており、多重反射の効果がうち消された為と考察される。

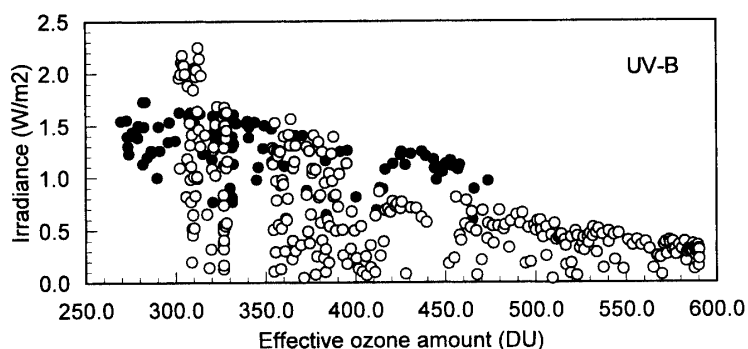


図5 全天 UV-B 放射量と実効オゾン全量の相関 (●: 昭和基地, ○: 平塚市)

Fig. 5. Relationships between global solar UV-B irradiance and effective ozone.

(●: Syowa, ○: Hiratsuka)

#### 4.2. UV-B 量, UV-A 量および日射量の変動幅

平塚市の全放射データは変動幅が大きい。一方、昭和基地の観測データは比較的安定しており、この傾向はエアマスが小さい夏の期間に明瞭となる。昭和基地の夏の最小放射量は最大放射量の約 1/2 であるのに対し、平塚市の夏の最小放射量はほぼ 0 を示している。このことは、昭和基地では各放射量に対する雲の影響が国内より小さいこと、つまり昭和基地で出現する雲は各放射の地上到達量に影響を与えにくいことを示唆している。特に昭和基地では過去に積乱雲はほとんど観測されていない (菊池ら, 1976; Japan Meteorological Agency, 1997)。本観測期間中も積乱雲は観測されなかった。理由としては、昭和基地の周辺は海水域のため夏の日差しを受けても積乱雲を生じる強い上昇気流が発生しにくいと考察される。一方、国内では夏に強い日射によって上昇気流が発生しやすく積乱雲が観測される場合が多い。以上から、積乱雲と積乱雲以外の雲では太陽放射の地上到達に及ぼす影響が異なり、昭和基地で一日毎の放射量の変動幅が小さかったのは積乱雲が発生しなかったためと考察される。

このように、昭和基地ではたとえ地ふぶき等で天気が悪くても太陽放射量は快晴日と大きく変わらないことがわかった。夏の昭和基地で屋外作業をする場合、天気によらず UV-B に対する防御が必要と考察される。

#### 4.3. オゾン全量に相関する太陽 UV-B 変動の抽出

以上の解析には全天放射量を利用した。全天紫外放射量の精度よい評価には天気の影響を除去する必要がある。天気の影響を除去する手法として、著者らは日照時間補正法を提案した (Takeshita *et al.*, 1996)。しかし、この手法は日照がある時の平均放射量を用いるため、今回の観測値には適用できない。地上に到達する UV-B 量と UV-A 量に影響を与える共通因子は太陽高度と雲である。また、近年の実測やシミュレーション計算によって、雲が UV-B, UV-A に与える影響はほぼ同じであることが明らかにされている (Seckmeyer *et al.*, 1996; Kylling *et*



*al.*, 1997).

これらの結果を利用して、UV-B 量と UV-A 量の比 (UV-B/UV-A) を取れば、天気の影響が除去され、オゾン変動の影響が抽出できると考えられる (Fioletov *et al.*, 1997). 昭和基地における UV-B/UV-A の変動を図 6 に示す. 観測期間中の UV-B/UV-A の変動は UV-B 量の変動 (図 1) に比べて滑らかな変動になっている. しかし, UV-B 量の場合は 11 月中旬から 12 月上旬に見られた放射量の一時的な減少傾向が UV-B/UV-A 処理後も明らかに残っている. UV-B/UV-A の変動を実効オゾン全量の変動 (図 2) と比べるとほぼ逆相関になる. つまり, 天気の影響を除去することによって UV-B に対するオゾンの影響が明らかになった. UV-B/UV-A と実効オゾン全量の相関を図 7 に示す.

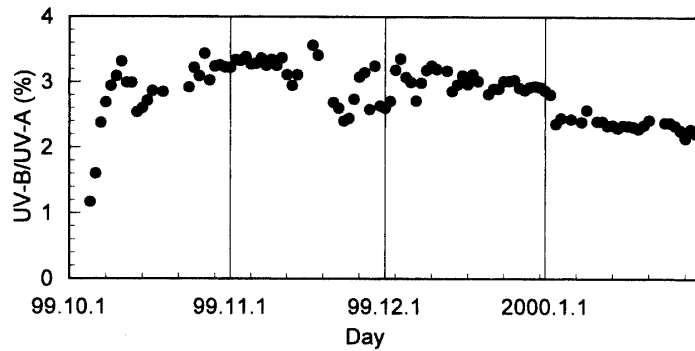


図 6 正午の UV-B 放射量と UV-A 放射量の比率の変動 (1999/10/4-2000/1/31)

Fig. 6. Ratio of global solar UV-B to UV-A irradiance at noon from October 4, 1999 to January 31, 2000 at Syowa Station.

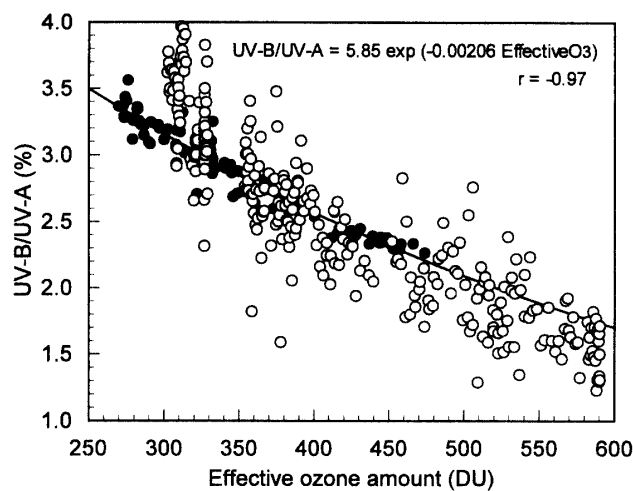


図 7 UV-B 放射量と UV-A 放射量の比率と実効オゾン全量との相関  
(●: 昭和基地, ○: 平塚市)

Fig. 7. Relationships between UV-B/UV-A and effective ozone.  
(●: Syowa, ○: Hiratsuka)

図7より、UV-B/UV-A と実効オゾン全量(●)の関係は指数関数で示され、相関係数 $-0.97$ の非常に強い負の相関があると判明した。両者の関係が指数関数で示されるのは、放射の吸収過程が一般的に Lambert-Beer の式で示されるからである。11月中旬から12月上旬に見られたUV-B量の一時的な減少傾向は、この実効オゾン全量の一時的な増加に応答したと考察した。さらに、平塚市の観測値(○)も昭和基地の観測値とほぼ同じ指数曲線上にある。平塚市の観測値が昭和基地の観測値と比較して分散が大きく、若干勾配が異なるのは、①平塚市のオゾン全量は筑波のオゾン全量と等しいと仮定している。②すべての放射計は準器と整合性が取れるように補正しているが完全ではない。という二つの理由に起因する。以上から、さらに以下に示す重要な結果が導出される。UV-B量とUV-A量の比(UV-B/UV-A)と観測時のエアマス(太陽高度)が解れば、オゾン全量が推定可能であると言える。現在、ドブソンオゾン分光計やブリューワオゾン分光光度計でのオゾン全量観測にはかなりの労力を要する。太陽放射はプリズムや回折格子を用いて単色光に分解された後、オゾンの吸収帯の波長とオゾンの非吸収帯波長での放射強度を求め、その比からオゾン全量が算出される。しかし、今回の解析結果は、分光器を用いることなくUV-B量とUV-A量を測定する帯域分光放射計があれば、UV-B量とUV-A量の比と観測時のエアマスからオゾン全量が推定可能であることを示している。

## 5. 結 言

1999年10月4日から2000年1月31日に、南極昭和基地でUV-B量、UV-A量を観測した。オゾンホールは観測開始から1999年12月下旬まで継続した。昭和基地のUV-Bは12月上旬に最大放射量を示した。なお、地ふぶきなどの悪天時にもUV-B量は大きな減少を見せなかった。このことは昭和基地に出現する雲形はUV-Bの地上到達量に影響を与えないと考察された。さらに、昭和基地のUV-B量を国内中緯度帯(神奈川県平塚市)のUV-B量と比較した。昭和基地の最大日射量は国内中緯度帯の3月上旬や9月上旬の放射量に相当するが、最大UV-B量は、国内中緯度帯の6月中旬や9月上旬(初夏もしくは初秋)の放射量に相当する事が判明した。また、UV-Bに対する天気の影響を除去した場合、天気の影響を除去したUV-B量(UV-B/UV-A)と実効オゾン全量との間には非常に高い相関が示された。この結果から、単色紫外放射を用いなくても帯域紫外放射UV-BとUV-Aの計測値とエアマス(太陽高度)を用いてオゾン全量が推定可能である事が明らかとなった。

昭和基地の12月上旬は次の隊が到着する直前であり、多くの隊員が屋外作業に従事している。また、12月上旬は白夜に入っており太陽紫外放射の被曝時間も長くなる。さらに、昭和基地上空のオゾンホールは1992年以降その大きな規模を維持し、オゾンホール消滅時期は遅くなっている(気象庁, 2000)。成層圏のハロゲン化合物によるオゾン層の破壊が2050年頃までは継続するとされており(WMO/UNEP, 1998)、今後数10年は成層圏オゾン減少による太陽UV計測が重要なことを示している。南極観測を継続的に実施する上で、観測隊員のUV-B被

曝に配慮し、早急にその防御対策について検討する必要があると考察される。

## 謝 辞

この研究観測は第40次南極地域観測 (JARE-40) 越冬研究観測として実施された。各種気象データのご提供と、UV-B観測についての有益な討論に対して JARE-40 気象部門隊員の方々に、また、太陽紫外放射観測をご支援くださった全観測隊員の方々に深く謝意を表します。

## 文 献

- Bais, A.F., Zerefos, C.S., Meleti, C., Ziomas, I.C. and Tourpali, K. (1993): Spectral measurements of solar UVB radiation and its relations to total ozone, SO<sub>2</sub>, and clouds. *J. Geophys. Res.*, **98**, 5199-5204.
- Blumthaler, M., Salzgeber, M. and Ambach, W. (1995): Ozone and ultraviolet-B irradiances: Experimental determination of the radiation amplification factor. *Photochem. Photobiol.*, **61**, 159-162.
- Bodhaine, B.A., Dutton, E.G. and Hofmann, D.J. (1997): UV measurements at Mauna Loa: July 1995 to July 1996. *J. Geophys. Res.*, **102**, 19265-19273.
- 遠藤恵子・松江浩二・竹下秀・坂田俊文・佐々木政子 (1998): 屋外の各種環境における太陽紫外 UV-B と UV-A 放射量の測定と評価. 照明学会誌, **82**, 877-884.
- Estupinan, J.G. and Raman, S. (1996): Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *J. Geophys. Res.*, **101**, 16807-16816.
- Fioletov, E.V., Kerr, B.J. and Wardle, D.I. (1997): The relationship between total ozone and spectral UV irradiance from Brewer observations and its use for derivation of total ozone from UV measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2997-3000.
- 伊藤朋之・上野丈夫・梶原良一・下道政則・上窪哲郎・伊藤真人・小林正人 (1991): 地上到達紫外線量の監視技術の開発ーオゾン層変化に伴う地上到達紫外線量の変化のスペクトル観測による評価ー. 研究時報, **43**(5), 213-273.
- Japan Meteorological Agency (1997): Meteorological Data at Syowa Station and Dome Fuji Station in 1996. *Antarct. Meteorol. Data*, **37**.
- 菊池勝弘・福谷博・笠原喜美子 (1976): 魚眼レンズカメラ2点観測による南極昭和基地の夏季の雲高について. 南極資料, **57**, 1-16.
- 気象庁編 (2000): オゾン層観測報告: 1999. 東京, 28-32.
- Kylling, A., Albold, A. and Seckmeyer, G. (1997): Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range: Physical interpretation. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 397-400.
- McKenzie, R.L. and Paulin, K.J. (1998): Effects of snow cover on UV irradiance and surface albedo: A case study. *J. Geophys. Res.*, **103**, 28785-28792.
- Sasaki, M., Takeshita, S., Sugiura, M., Sudo, N., Miyake, Y., Furusawa, Y. and Sakata, T. (1993): Ground-based observation of biologically active solar ultraviolet-B irradiance at 35°N latitude in Japan. *J. Geomagn. Geoelectr.*, **45**, 473-485.
- Seckmeyer, G., Erb, R. and Albold, A. (1996): Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2753-2755.
- Takeshita, S., Miyai, I., Kato, T., Yajima, J., Sakata, T. and Sasaki, M. (1992): A relationship between UV-B irradiance and biological killing efficiency on bacteriophage T1. *Photomed. Photobiol.*, **14**, 189-190.
- Takeshita, S., Sakata, T. and Sasaki, M. (1996): A method of normalizing solar UV-B irradiance measurements to values under fine weather conditions. *Proceedings of the International Radiation Symposium*, 902-904.
- UNEP (1989): Environmental Effects Panel Report, Pursuant to Article 6 of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer under the Auspices of the United Nations Environment Program (UNEP), Nairobi Kenya.

WMO, EU, UNEP, NOAA, NASA (1998): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998 Executive Summary. 18 p.

(2000 年 9 月 21 日受付; 2000 年 12 月 27 日改訂稿受理)